

考虑网架对短路电流适应性的输电网扩展规划

陈伟¹, 刘莹², 刘晓宇²

1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610001;
2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要:随着社会经济的发展,全社会的用电量越来越大,这需要更大更强的电网来支撑。输电网的扩展规划是电网发展的决策性工作,关系到整个系统运行的灵活性和费用的经济性。然而,随着建设规模的扩大,输电网中迅速增大的短路电流水平严重地危及着电网的安全稳定。从经济性的角度建立了输电网扩展规划的优化模型,并在规划中考虑了线路的开断对网络阻抗的修正,更精确地计算了短路电流。选取 Garver-6 节点系统作为算例,基于遗传算法实现了扩展规划的程序流程,验证了优化模型的可行性,证明了在考虑网架结构对短路电流的适应性后,可以找到适应度更好、更经济的规划方案。

关键词: 输电网规划; 短路电流; 网架适应性

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)01-0074-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.017

Transmission Expansion Planning Considering Adaptability of Grid to Short-circuit Current

Chen Wei¹, Liu Ying², Liu Xiaoyu²

1. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610001, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The power consumption grows with the social and economic development, so it needs a bigger and stronger power system. As a decision-making work, transmission expansion planning influences the operational flexibility and the cost of whole system. However, with the expansion of construction scale, the rapid increase of short-circuit current in transmission network endangers the security and stability of power grid. An optimization model of transmission expansion planning is established from the prospective of economy, which makes the calculation of short-circuit current more precisely by correcting network impedance. The Garver-6 bus system is used as an example to verify the feasibility of optimization model, and it proves that a better and more economical planning scheme can be found after considering the adaptability of grid to short-circuit current.

Key words: transmission planning; short-circuit current; grid adaptability

0 引言

现代社会的发展对电力系统的依赖性日益增加,电力系统面临着繁重的规划任务^[1-2]。其中,输电网规划工作是一项非常复杂的系统工程,其复杂性突出地表现在其具有规模大、不确定因素多等特点。输电网规划发展的决策性工作,关系到整个系统运行的灵活性和费用的经济性。

长期以来,输电系统的优化规划问题一直未能获得令人满意的解决。目前规划方法大致可分为启发式方法、数学优化方法和智能算法三大类^[3-5]。启发式方法根据给定的性能指标对所有的待选线路进行排序,逐步扩展网络直到满足运行要求为止。这种方法简单灵活,工程概念明确,但是却存在着性能指标难以全面反映系统特性以及算法本身难以给出全局最优解的问题。数学优化算法将网络规划问题归纳为标准的数学规划问题,然后采用相应的优

化算法求解。这种方法往往受到规划问题的复杂性和求解规模的限制而难以达到实用的目的。智能算法简单、直观、计算量小,虽然不是严格的优化方法,不一定得到全局最优解,但是便于人工参与决策,而且能够给出符合工程实际的较优解,因而得到了比较广泛的应用^[6-7]。其中遗传算法就是最为常见的一种。

遗传算法是一种根植于自然遗传学和计算机科学智能优化方法^[8-10]。其实质是将优胜劣汰、适者生存的遗传机理抽象出来,形成一种非常便于计算机实现的算法。遗传算法的计算过程是将实际的优化问题编码成符号串,也称为染色体,实际问题的目标函数则用染色体的适应度函数来表示^[11-13]。

随着建设规模的扩大,输电网中迅速增大的短路电流水平严重地危及着电网的安全稳定。传统的“先规划,后校验”的规划思路未能考虑短路电流的主动性^[14]。因此,下面基于遗传算法,设计了包含考虑断线限流下短路电流修正的三层程序结构,并通过算例证明,考虑了网架结构对短路电流的适应性后,有望找到适应度更好且更经济的扩展规划方案。

所提方案为建立更符合实际的输电网优化规划模型提供了思路,对考虑短路电流的输电网扩展规划研究有一定指导作用。

1 输电网扩展规划优化模型

传统的输电网扩展规划更依赖工程经验,注重规划方案的外送能力和对电网电力平衡的贡献。而所提方案的优化模型则更偏重于经济性。

这里考虑的经济性目标包括:1)在满足输电能力的前提下,使电网建设费用尽可能少;2)扩建后的电网,其每年的运行成本要尽可能低;3)扩建后的电网,其短路电流的增大程度要尽可能低。设计优化模型如下:

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3$$

$$F_1 = \lambda_1 \frac{\alpha(1+\alpha)^\omega}{(1+\alpha)^\omega - 1} \sum_{i=1}^k H_i Z_i \quad (1)$$

$$F_2 = \lambda_2 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \rho \left(\frac{P_{ki}}{\cos\theta} \right)^2 R_i T_k \quad (2)$$

$$F_3 = \min \left\{ \lambda_3 \sum_{r=1}^{R_i} (Z_i^* - Z'_{ir}) \right\} \quad (3)$$

式中: F 为一个规划方案的综合年费; F_1 、 F_2 和 F_3 分别为规划方案的电网建设年费、电网运行年费和短路电流惩罚项。

式(1)中: H_i 为第 i ($i < k$)条线路的决策变量, $i = 1$ 代表建该条线路, $i = 0$ 代表不建该条线路; Z_i 为第 i 条线路的建设成本; α 和 ω 分别是年利率和线路的服役年限。

式(2)中: P_{ki} 为第 k ($k < m$)种运行方式下,第 i ($i < n$)条支路上通过的有功功率; $\cos\theta$ 为功率因素; R_i 为第 i 条支路的电阻; T_k 为第 k 种运行方式所占全年时间的比例; ρ 为电价; λ_1 、 λ_2 为人为给定的系数。

式(3)是考虑短路电流影响的惩罚项,惩罚项中仅考虑危害最为严重的节点三相短路电流。若规划出的网架结构能满足三相短路电流的校验,则一定可以适应其他类型的短路。根据三相短路电流的实用计算,可将其等效为节点自阻抗的计算^[15]。该惩罚项本身含有一个寻优过程,即在 r 条可开断线路中寻找最合适的一条线路,使得开断该条线路后,全网短路电流增量最少,并计入目标函数的惩罚项。式(3)中的 R 为可开断线路的集合; Γ 为节点短路集合; Z_i^* 为第 i 个节点处发生短路时,能使规划方案满足短路电流校验的最小自阻抗; Z'_{ir} 为第 i 个节点发生三相短路,通过开断第 r 条可开断线路后, i 节点处修正后的自阻抗; λ_3 为人为给定的系数。

在传统的输电网规划中,通常是先规划出网架结构,再进行短路电流校验,若不满足校验则直接将该规划方案舍弃。而在所提的规划模型中,对于短路电流越限的规划方案,先考虑断开合适的低压线路,在新的网架结构下计算短路电流惩罚项,体现了在规划中考虑短路电流的主动性。

优化模型的主要约束包括:潮流约束、支路热稳定约束、节点最大出线数约束以及无孤立节点约束。

2 扩展规划的程序流程设计

所提的扩展规划采用遗传算法。遗传算法是一种非常便于计算机实现的智能算法,它通过在种群中设置一定数量的染色体并给定最大遗传代数等参数,以适应度计算为核心,通过选择、交叉、变异3种遗传操作不断更新种群直至收敛。为实现目标的优化,在所提的程序设计中,共造了3个层次。

2.1 外层程序

外层程序是基于遗传算法的输电网扩展规划。对于每条可建线路,都用一个 0-1 变量来表示,0 表示不建设该条线路,1 代表建设该条线路,则一个扩展规划方案为一串 0-1 序列,编码为一条染色体。适应度函数直接取优化模型的目标函数。其程序流程见图 1。

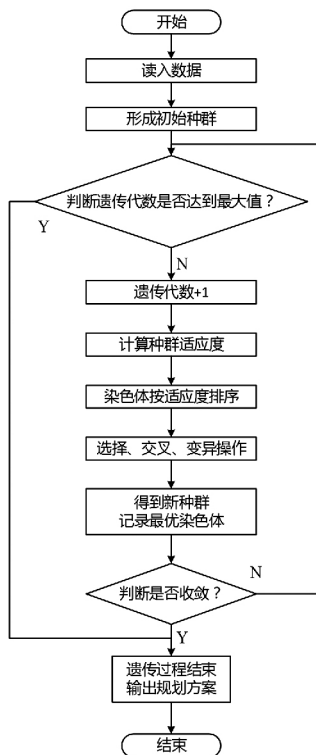


图 1 基于遗传算法的输电网扩展规划程序流程

2.2 中间层程序

中间层是染色体的适应度计算。种群中有成百上千的染色体(即规划方案),先进行潮流计算,判断当前方案是否满足约束。若不满足约束,直接赋予一个值较大的适应度,让不满足约束的方案在遗传操作中逐渐被淘汰掉。若满足约束,则进行短路电流计算,对于不越限的方案可直接计算建设年费和运行年费;对于短路电流越限的方案通过开断线路修正阻抗矩阵,再计算方案的短路电流惩罚项,最后计算染色体的综合适应度。其程序流程见图 2。

2.3 内层程序

内层程序是考虑断线限流的短路电流修正,即对于短路电流越限的规划方案。先考虑断开合适的低压线路,在新的网架结构下计算短路电流惩罚项,以体现在规划中网架对短路电流适应的主动性^[14]。惩罚项的构造见式(3)。对于可开断线路数较少的

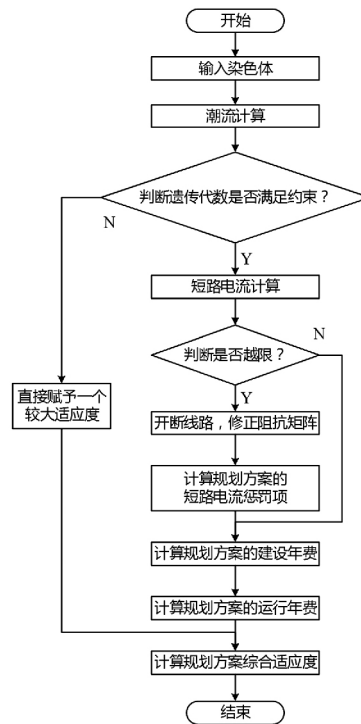


图 2 染色体适应度计算程序流程

情况,一般采用枚举法来寻找能使全网短路电流增量最少的线路;对于可开断线路数较多的情况,可以事先用灵敏度分析来对线路进行排序,再开断搜索出的能使全网短路电流增量最少的线路。

3 算例分析

为验证优化模型的正确性和程序流程的有效性,选取经典的 Garver-6 节点系统作为算例^[15]。该系统中有 6 个节点和 6 条已建线路,有 1 个孤立节点。设 2 号节点为 500 kV 节点,其余为 220 kV 节点。部分基础数据,如某水平年中各节点的负荷情况和装机情况见表 1。

表 1 基础数据

节点号	负荷/MW	装机/MW	电压等级/kV
1	80	150	220
2	240	0	500
3	40	360	220
4	160	0	220
5	120	0	220
6	0	600	220

线路长度等其他详细数据见参考文献[15]。计算中,功率因数取 0.98,线路服役年限取 20 年,年利率取 3.25%。算例采用 Matlab 进行计算,根据第 1 节和第 2 节中的数学模型和流程编写程序。下

面,对比两种情况下的计算结果:1)考虑断线限流的情况;2)不考虑断线限流的情况。

考虑断线限流的情况下,得到规划结果为:遗传17代后收敛,最优方案适应度为191.4,共建设7条线路。其中,节点1—5新建1条线路;节点2—6新建2条线路;节点3—5新建2条线路;节点4—6新建2条线路,见图3。

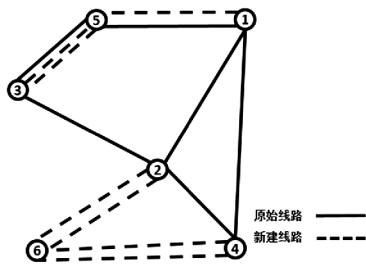


图3 考虑断线限流时的规划网架图

不考虑断线限流的情况下,得到规划结果为:遗传21代后收敛,最优方案适应度为211.7,共建设9条线路。其中,节点1—2新建1条线路;节点1—5新建1条线路;节点2—6新建1条线路;节点3—5新建2条线路;节点3—6新建2条线路;节点4—6新建2条线路,见图4。

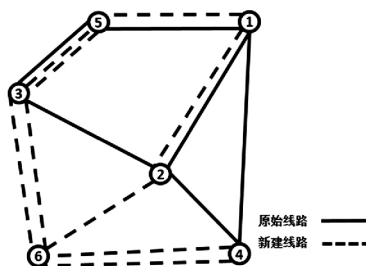


图4 不考虑断线限流时的规划网架图

对比考虑断线限流情况和不考虑断线限流情况下的规划结果,容易看出:在考虑断线限流后,所找出的最优规划方案有更好的适应度,新建线路数也减少了两条,方案更为经济。这是由于在规划中“主动”地修正了短路电流,那些已越限的短路电流,在开断线路的抑制措施下,被修正为越限量更小甚至不越限的短路电流,从而减小了短路电流惩罚项的大小,进一步减小了染色体适应度使其更优。

4 结论与展望

前面从经济性的角度建立了输电网扩展规划的优化模型,基于遗传算法实现了扩展规划的程序流程。在适应度函数的构造中,增添了反映短路电流

影响的惩罚项,并通过考虑开断线路来修正阻抗矩阵,更准确地计算了短路电流。选取了Garver-6节点系统作为算例,基于遗传算法实现了扩展规划的程序流程,验证了优化模型的可行性,证明了在考虑网架结构对短路电流的适应性后,可以找到适应度更好、更经济的规划方案。

为简化模型和便于程序计算,仅考虑了三相短路电流。然而其在实际工程中发生的概率较小,进一步的研究可以考虑加入更复杂更常见的短路,如单相短路、两相短路。为使得规划的目标函数更具实际意义,后续研究中可以考虑引入更多反映运行特性的惩罚项,再根据工程偏好通过控制惩罚项的权值来动态调整优化目标。

参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统规划基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [2] 韩晓慧, 王联国. 输电网优化规划模型及算法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 143-148.
- [3] 周金辉, 余贻鑫, 曾沅. 大规模风电接入下输电网扩展规划的启发式优化算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 66-70.
- [4] 王林梅. 城市电网优化规划问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] 聂宏展, 王毕元, 孙金红, 等. 基于混沌人工鱼群算法的输电网规划方法[J]. 电网技术, 2010(12): 109-113.
- [6] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于人工鱼群算法的输电网规划[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 11-15.
- [7] 李芸, 孟洪斌, 李传虎. 基于量子序优化混合算法的输电网规划[J]. 四川电力技术, 2011, 34(2): 44-47.
- [8] 刘丽. 遗传算法在输电网规划中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [9] 周建平, 林韩, 温步瀛. 改进量子遗传算法在输电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 90-95.
- [10] 黄慧, 顾波. 改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012(22): 64-67.
- [11] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 36(3): 175-181.
- [12] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11-15.

(下转第82页)

表 3 机组参数和负荷冲击量参考值

电厂	类型	容量/MW	T_j/s	T_w/s	调速器			负荷冲击/MW	间隔时间/s
					K_p	K_i	K_d		
1	混流式	200	7.65	2	1.5	0.15	0.5	7.5	40
2	混流式	129	7	2.5	1.5	0.15	0.5	6	40
3	混流式	88.89	6	1.5	1.5	0.15	0.5	4	40
4	冲击式	133.3	7.95	0.01	1.5	0.15	0.5	6	40
5	轴流转桨式	176.5	5.88	2.5	1.5	0.15	0.5	7	40

启动初期建议的恢复策略:

1) 黑启动初期负荷单次冲击量大小以及负荷投入时间间隔可参考表 3 进行,表中 T_j 为机组惯性时间常数, T_w 为水锤时间常数,调速器参数为控制器 PID 参数。

2) 在水电通道上的子系统与其他子系统并列时,常常会出现过电压问题,应注意在并列点两侧合理投切低压电抗器以抑制电压偏高。

3) 由于风电厂和光伏电厂对调频调压无贡献,反而会恶化黑启动初期电网的稳定性。在子网与外部电网并列前,建议禁止风电、光伏电厂并网,待子网与外部电网并列后,才可以并网。

4) 黑启动初期,为防止空充主变压器对启动电源造成破坏,启动电源宜带下一级变电站主变压器零起升压,该变电站带上一定负荷后再考虑后续变电站空充主变压器。

4 结 论

前面研究了黑启动初期负荷恢复的策略,探索体现负荷恢复数量和恢复速度的实用方法,并进一步研究了黑启动操作过程中的暂态稳定、过电压等电磁暂态问题的自动校核技术。在此基础上开发了一套电网大停电后恢复方案制定及决策支持实用化系统。利用开发的决策支持系统,制定了四川电网 11 个子系统启动方案并进行了风险校核及子系统间并列操作风险校核。最终形成了四川电网大停电后恢复方案,给出了典型水电机组作为黑启动电源

- (上接第 77 页)
- [13] 盛四清,王浩. 用于配电网规划的改进遗传算法[J]. 电网技术 2008, 32(17): 69-72.
 - [14] 张思. 考虑短路电流的输电网优化规划[D]. 杭州: 浙江大学 2012.
 - [15] 张勇,王云辉,沈建涛,等. 输电网短路电流计算[J]. 电网技术 2007(S1): 39-42.

在启动初期的负荷冲击量参考值、黑启动初期建议的恢复策略。

参考文献

- [1] 王洪涛,刘玉田,邱夕照. 基于分层案例推理的黑启动决策支持系统[J]. 电力系统自动化 2004, 28(11): 49-52.
- [2] 苏德生,顾雪平,赵书强,等. 河北南网黑启动决策支持系统的研究开发[J]. 电力系统自动化 2004, 28(12): 45-50.
- [3] 周云海,闵勇,杨滨. 黑启动及其决策支持系统[J]. 电力系统自动化 2001, 25(15): 43-46.
- [4] 马燕峰,赵书强,顾雪平,等. 黑启动过程中操作过电压的仿真计算[J]. 高电压技术 2006, 32(11): 123-126.
- [5] 魏巍,向天堂,丁理杰,等. 励磁涌流引发的谐波过电压机理分析及抑制措施研究[J]. 电测与仪表 2016, 53(24): 24-31.
- [6] 罗彬,李刚,程春田,等. 基于 PSD-BPA 的省地一体化电力系统设备参数管理策略[J]. 电力系统自动化 2015, 39(6): 114-119.
- [7] 汤涌,卜广全,印永华,等. PSD-BPA 潮流程序用户手册[S]. 北京:中国电力科学研究院 2008.
- [8] 汤涌,卜广全,印永华,等. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[S]. 北京:中国电力科学研究院 2008.
- [9] DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [10] Q/GDW 1404-2015 国家电网安全稳定计算技术规范[S].

作者简介:

史华勃(1987),硕士、工程师,主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期:2017-11-02)

作者简介:

陈伟(1974),工程师,主要研究方向为变电运维检修、配网自动化;

刘莹(1985),工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定;

刘晓宇(1986),工程师,主要研究方向为电网规划设计、电力系统分析与稳定。

(收稿日期:2017-09-18)